



DEUTSCHES
PATENTAMT

②1 Aktenzeichen: P 44 36 500.4
②2 Anmeldetag: 13. 10. 94
④3 Offenlegungstag: 11. 5. 95

DE 44 36 500 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1
26.10.93 DE 43 36 402.0

⑦1 Anmelder:
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

⑦2 Erfinder:
Schöppe, Günter, 07745 Jena, DE; Heinz, Hartmut,
Dipl.-Phys., 07749 Jena, DE; Kley, Ernst-Bernhard,
Dr.rer.nat., 07749 Jena, DE

⑤4 Optisches Projektionsgitter

⑤7 Optisches Projektionsgitter, insbesondere zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten, mit binärer optischer Dichteverteilung, zur Erzeugung eines projizierten Streifenbildes mit sich periodisch änderndem Transmissionsverlauf, mit zum projizierten Streifenverlauf senkrechten Gitterstreifen, deren Streifenbreite sich entlang ihrer Längsrichtung periodisch und zu den Nachbarstreifen phasengleich ändert, sowie eine optische Anordnung in einem Mikroskop zur Erfassung und Vermessung von Oberflächen durch Aufprojektion eines Gitters mit binärer optischer Dichteverteilung mittels eines Projektionsobjektivs und Auswertung des auf der Oberfläche erzeugten Streifenbildes in einer Auswerteeinheit, wobei das Gitter senkrecht zum projizierten Streifenverlauf Gitterstreifen mit sich entlang ihrer Längsrichtung periodisch und zu den Nachbarstreifen phasengleich ändernder Streifenbreite aufweist und eine definierte Unschärfe des gesamten projizierten Gitters erzeugt wird.

DE 44 36 500 A 1

Die Erfindung betrifft eine optische Anordnung zur Erfassung und Vermessung von Oberflächen durch Aufprojektion eines Gitters sowie ein optisches Projektionsgitter mit binärer optischer Dichteverteilung.

Derartige Projektionsgitter sind beispielsweise als Zusatzeinheit für ein- oder zweistufige Auflichtmikroskope vorgesehen, die mit beugungsbegrenzter Optik arbeiten.

Außer den sonst üblichen Informationen über die Objekteigenschaften in den beiden Koordinaten senkrecht zur optischen Achse werden noch Informationen über die vertikale Ausdehnung gewonnen.

Je nach Art der Weiterverarbeitung der dreidimensionalen Information können z. B. 3D-Bilder der Oberfläche, Angaben zur Rauigkeit, zur Welligkeit oder zu Höhenunterschieden von Einzelobjekten erzeugt werden.

Im Phase-Shift-Verfahren (P. Carre, Metrologia Vol. 2, No. 1, 1966, S. 13–23) werden beispielsweise Interferogramme von Oberflächen mit optischer Qualität ausgewertet, indem an einzelnen oder allen Bildpunkten die Lichtintensität nacheinander bei n Phasenlagen einer Vergleichsfläche des Interferometers gemessen wird.

Die Intensitätsinformation kann beispielsweise mit einer CCD-Kamera aufgenommen werden.

Das Phase-Shift-Verfahren kann auch bei der Projektion eines Musters paralleler Streifen unter einem Winkel ungleich 90 Grad auf das Untersuchungsobjekt und der Erfassung der durch die Höhenunterschiede verursachten Streifenverschiebung eingesetzt werden, indem gleichfalls die Intensität der von der Oberfläche reflektierten oder gestreuten Streifen bei n Phasenlagen der Streifen gemessen wird.

Um den gleichen mathematischen Apparat zur Höhenberechnung verwenden zu können, weist das Projektionsgitter in Shiftrichtung einen sinusquadratförmigen Intensitätsverlauf auf.

Annähernd sinusquadratförmige Projektionsgitter werden holografisch auf fotografischen Platten erzeugt.

Bei der Vermessung mikroskopischer Objekte stören jedoch die unvermeidlichen Gitterfehler durch die statistische Verteilung der geschwärzten Silberkörner und die nichtlineare Schwärzungskurve und durch Fehler bei der holografischen Abbildung. Es werden Rauigkeiten und Welligkeiten auf der Oberfläche vorgetäuscht, die die Höhenauflösung des Meßverfahrens drastisch einschränken, insbesondere im Bereich kleiner Mikroskopvergrößerungen, für die das Streifenprojektionsverfahren als Ergänzung zu interferometrischen Phase-Shift-Verfahren besonders interessant ist, die durch die Bindung an die Wellenlänge des Meßlichtes (sichtbarer Bereich) keine beliebige Ausdehnung auf die Messung großer Höhenunterschiede gestatten.

In der Veröffentlichung von M. Gruber, G. Häusler "Simple, robust and accurate phasemeasuring triangulation", OPTIK 89, No. 3 (1992), S. 118–122, wird die astigmatische Abbildung binärer Gitterstreifen mit wellenförmigem Streifenverlauf beschrieben.

Die Streifen sind paarweise zueinander um 1/4 der Streifenperiode phasenversetzt. Durch eine Zylinderlinse mit einer zeilenförmigen Beleuchtungsapertur wird jeweils ein Bildausschnitt auseinandergezogen abgebildet wobei die Verschiebung der aufprojizierten Streifenverteilung durch Veränderung des Bildausschnittes erzielt wird. Die projizierte Streifenperiode ist gleich der periodischen Änderung der Gitterstreifen. Die astigmatische Abbildung bedingt eine in unterschiedlichen Koordinatenrichtungen unterschiedliche Abbildungsqualität.

Die oben erwähnte Anwendung als Zusatzeinheit für ein Mikroskop erfordert jedoch die Abbildung des Gitters durch das gleiche hochaperturige optische System, durch das die Objektvermessung erfolgt. Die gleiche hohe laterale Auflösung in beiden Koordinatenrichtungen bei Abbildung des gesamten Gitters durch das Projektionsobjektiv ist in dieser Anwendung zwingend vorgeschrieben.

In DE-A1 40 16 362 ist als Projektionsgitter ein Streifengitter mit binärer Transmissionsverteilung und gerader Streifenbegrenzung angegeben, bei dem der erwünschte sinusquadratförmige Transmissionsverlauf entweder durch Variation der Streifenbreite bei konstantem Abstand oder durch Variation des Streifenabstands bei konstanter Breite erzielt wird, wobei Streifenbreite und/oder Streifenabstand unter dem Auflösungsvermögen der Projektionsoptik liegen.

Diese sehr kleinen Abmessungen müssen äußerst präzise eingehalten werden, weil systematische Teilungsfehler zu periodischen Meßfehlern führen.

Bei Anwendung im Mikroskop sind die erforderlichen Toleranzen für die Gitterherstellung mit den bekannten Technologien kaum einzuhalten.

Die Erfindung geht von der Aufgabe aus, ein leicht und mit ausreichender Präzision herstellbares Projektionsgitter zu erstellen, das geringere statistische und periodische Intensitätsfehler enthält als die holografisch auf Fotomaterial erzeugten Gitter, jedoch zur mikroskopischen Vermessung von Oberflächenstrukturen mittels Streifenprojektion und Phase-Shiftverfahren bei allen mikroskopischen Vergrößerungsstufen geeignet ist.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des ersten Patentanspruches gelöst.

Eine optische Anordnung zur Erfassung und Vermessung von Oberflächen durch Aufprojektion des erfindungsgemäßen Projektionsgitters ist Gegenstand des Anspruchs 2.

Besonders vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Durch die binäre Ausbildung der erfindungsgemäßen Transmissionsgitter, wobei die Breite der Längsstreifen durch die zu erzielende Auflösung festgelegt wird, aber auch durch geeignete Mittel zur Erzeugung eines unscharfen Abbildes des Projektionsgitters in der Bildebene, wobei z. B. ein sinusförmiger Transmissionsverlauf erreicht werden kann, können die genannten Nachteile der holografisch erzeugten Gitter vermieden werden, indem mit lithografischen Verfahren, beispielsweise einer Elektronenstrahlbelichtungsanlage eine Art "binäre Maske" oder "Schattenmaske" erzeugt wird, die als Transmissionsgitter dient.

Durch eine genügend kleine Gitterperiode der zum projizierten Streifenverlauf senkrechten Gitterstreifen werden die Nachteile der astigmatischen Abbildung vermieden.

Durch Strichbreitenmodulation der binären Gitterstreifen senkrecht zum projizierten Streifenverlauf wird das mikroskopische Meßverfahren unempfindlich gegen Teilungsfehler des die Modulation erzeugenden Gitters mit sich ändernder Breite jedes Gitterstriches.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der schematischen Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen

Fig. 1 Den Strahlengang einer optischen Anordnung zur Streifenprojektion unter Verwendung eines erfindungsgemäßen Projektionsgitters mit sinusquadratförmigem Transmissionsverlauf in vergrößerter Darstellung eines Ausschnittes.

Fig. 2 Eine Ausführungsform des Projektionsgitters sowie Darstellungen des Transmissionsverlaufes $I(x)$, $I(y)$ an ausgewählten Linien A, B auf der y- bzw. auf der x-Koordinate.

Eine polychromatische Lichtquelle 1 beleuchtet über einen Kollektor 9 und eine exzentrische Aperturblende 2 ein im Strahlengang senkrecht zu den Gitterlinien verschiebbar angeordnetes Projektionsgitter 3 mit erfindungsgemäßem Transmissionsverlauf.

Über ein Linsensystem 10, einen Strahlteiler 4 und eine Aperturblende 12 sowie ein Objektiv 5, das auswechselbar sein kann, wird das Gitterstreifenmuster auf die zu untersuchende Oberfläche 6 unter einem Winkel α zur Oberflächennormale projiziert. Die vom Objekt 6 reflektierten und/oder gestreuten Lichtstrahlen verlaufen über die Strahlteiler 4 und ein Projektiv 7, das das Licht des durch die Oberflächenstruktur des Objektives 6 gestörten Streifenmusters auf eine CCD-Kamera 8 abbildet. Die von der CCD-Kamera gemessene Bildinformation gelangt in einen Frame-Grabber 9, wo sie durch einen PC 10 abgerufen werden kann. Der PC 10 weist weiterhin eine Verbindung zu einem Gittershifter 11 auf, der eine definierte Verschiebung des Projektionsgitters vornimmt.

In Fig. 2 ist ein mittels einer Elektronenstrahlbeschichtungsanlage erzeugtes erfindungsgemäßes Projektionsgitter dargestellt.

Entlang der Linien A, B in x-Richtung sowie C, D in y-Richtung ist weiterhin der Transmissionsverlauf vergrößert ausschnittsweise dargestellt.

Der Transmissionsverlauf auf jeder Linie parallel zu der Koordinatenrichtung x, kann dargestellt werden durch die Fourierreihen:

$$T(x) = \frac{C(y)}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin ic(y)}{i} \cos ix \right]$$

Wird dieses Gitter durch ein beugungsbegrenztes Objektiv abgebildet, gilt für die Modulationsübertragungsfunktion MTF:

$$MTF(f_x) = \frac{2}{\pi} \left(\arccos \left(\frac{f_x}{f_g} \right) - \left(\frac{f_x}{f_g} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{f_x}{f_g} \right)^2} \right) \text{ für } f_x \leq f_g$$

$$MTF(f_x) = 0 \text{ für } f_x > f_g$$

Hinter dem Mikroskop entsteht der Intensitätsverlauf

$$I(x) = \frac{I_0 C(y)}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^n MTF_{ix} \frac{\sin ic(y)}{i} \cos ix \right]$$

und

$$n = \text{trunc} \frac{i}{x_{\text{per}} \cdot f_g}$$

Wird das Gitter so gestaltet, daß $f_x > f_g$ gilt, wird $MTF(f_x) = 0$ und

$$I(x) = \frac{I_0 c(y)}{\pi}$$

Wird dafür gesorgt, daß

$$c(y) = \sin^2 \left(\frac{y \cdot \pi}{y_{\text{per}}} \right)$$

gilt, erhält man parallel zur x-Richtung eine nur von y abhängige, also konstante Intensität

$$I(x) = I_0 \sin^2 \left(\frac{y \cdot \pi}{y_{\text{per}}} \right)$$

Wird noch $f_y < f_g$ eingehalten erhält man nach Abbildung durch das beugungsbegrenzte Objektiv ein Strei-

fengitter mit \sin^2 -förmigen Intensitätsverlauf senkrecht zur Streifenrichtung.

Wird dieses Gitter auf ein mikroskopisches Objekt projiziert, kann aus der Gitterdeformation durch das Objekt die Berechnung von Objekthöhen mit Hilfe des für die Höhenberechnung mit den interferometrischen Phaseshiftverfahren bekannten mathematischen Apparates erfolgen.

Neben den genannten Bedingungen zur Erzeugung einer definierten Unschärfe der Abbildung durch entsprechende Wahl der Breite der Längsstreifen sind auch andere Maßnahmen zur Erzeugung eines für die Auswertung geeigneten sinusquadratförmigen Transmissionsverlaufs des Streifengitters denkbar. Die notwendige Beugungsbegrenzung des Objektives 5 kann auch dadurch erreicht werden, daß in der Pupillenebene durch geeignete, auch nicht kreisförmige Blenden die höheren Beugungsordnungen der freien Gitterstruktur so ausgeblendet werden, daß sie nicht zur Objektbeleuchtung beitragen.

Weiterhin kann die Lage der Beugungsbilder beeinflußt werden durch Einschränkung des Wellenlängenbereiches des Meßlichtes. Wird der blaue Bereich des Meßlichtes gedämpft, verlagert sich der Schwerpunkt der höheren Beugungsordnung von der nullten Beugungsordnung weg, so daß er außerhalb der Objektivpupille liegen kann.

Beispielsweise kann bei größerer Breite der Längsstreifen die Auflösung der Aufnahmeeinheit einer CCD-Kamera herabgesetzt werden, indem mehrere Pixel zu einem "Superpixel" zusammengefaßt werden, bzw. ("Subpixel") nur jedes zweite oder dritte Pixel verwendet werden. Weiterhin können in bekannter Weise durch Softwarefilterfunktion die hohen Ortsfrequenzen des Bildes gedämpft werden.

Patentansprüche

1. Optisches Projektionsgitter, insbesondere zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten, mit binärer optischer Dichteverteilung,

zur Erzeugung eines projizierten Streifenbildes mit sich periodisch änderndem Transmissionsverlauf, mit zum projizierten Streifenverlauf senkrechten Gitterstreifen, deren Streifenbreite sich entlang ihrer Längsrichtung periodisch und zu den Nachbarstreifen phasengleich ändert.

2. Optische Anordnung in einem Mikroskop zur Erfassung und Vermessung von Oberflächen durch Aufprojektion eines Gitters mit binärer optischer Dichteverteilung mittels eines Projektionsobjektives und Auswertung des auf der Oberfläche erzeugten Streifenbildes in einer Auswerteeinheit,

wobei das Gitter senkrecht zum projizierten Streifenverlauf Gitterstreifen mit sich entlang ihrer Längsrichtung periodisch und zu den Nachbarstreifen phasengleich ändernder Streifenbreite aufweist und eine definierte Unschärfe des gesamten projizierten Gitters erzeugt wird.

3. Optisches Projektionsgitter nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet dadurch, daß sich die zum projizierten Streifenbild senkrecht liegenden Gitterstreifen in ihrer Breite sinusförmig ändern.

4. Optisches Projektionsgitter nach einem der Ansprüche 1—3, gekennzeichnet dadurch, daß die Gitterstreifen in ihrer Längsrichtung einseitig gerade verlaufen und die jeweils andere Seite einen kurvenförmigen Verlauf aufweist.

5. Optische Anordnung nach einem der Ansprüche 1—4, gekennzeichnet dadurch, daß die Abmessungen des Projektionsgitters zu denen des projizierten Streifenbildes in einem Verhältnis von etwa 1 : 10 bis etwa 1 : 50 stehen.

6. Optische Anordnung nach einem der Ansprüche 1—5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung einer definierten Unschärfe der Abstand der Gitterstreifen kleiner ist als das Reziproke der Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion des Projektionsobjektives und die aus der Gitterperiode ermittelte Gitterfrequenz kleiner ist als die Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion des Projektionsobjektives.

7. Optische Anordnung nach einem der Ansprüche 1—6, dadurch gekennzeichnet, daß die Unschärfe durch Einstellung des Auflösungsvermögens der Auswerteeinheit erzeugt wird.

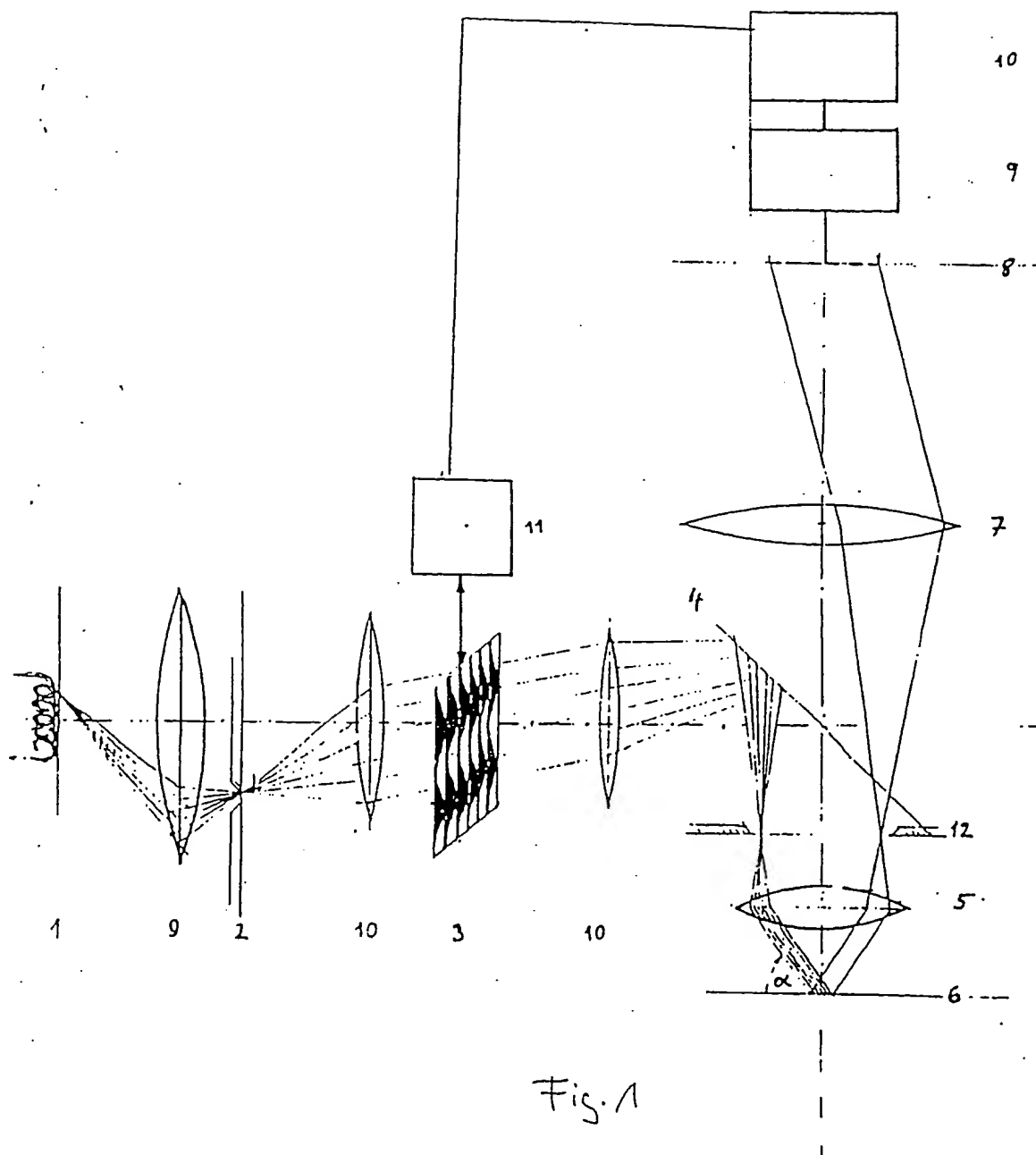
8. Optische Anordnung nach einem der Ansprüche 1—7, gekennzeichnet dadurch, daß die Unschärfe durch Einschränkung des Wellenlängenbereiches des Meßlichtes erzielt wird.

9. Verfahren zur Herstellung eines Projektionsgitters, nach einem der Ansprüche 1—8, gekennzeichnet durch die Belichtung einer beschichteten Glasplatte mit einer Elektronenstrahlbelichtungsanlage.

10. Verfahren nach Anspruch 9, gekennzeichnet dadurch, daß mit der Elektronenstrahlbelichtungsanlage ein Vorbild des Gitters erzeugt und dieses mit einem Photorepeater lithografisch verkleinert wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 10, gekennzeichnet durch Verwendung einer chrombeschichteten Glasplatte, die eine Photoresistschicht aufweist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



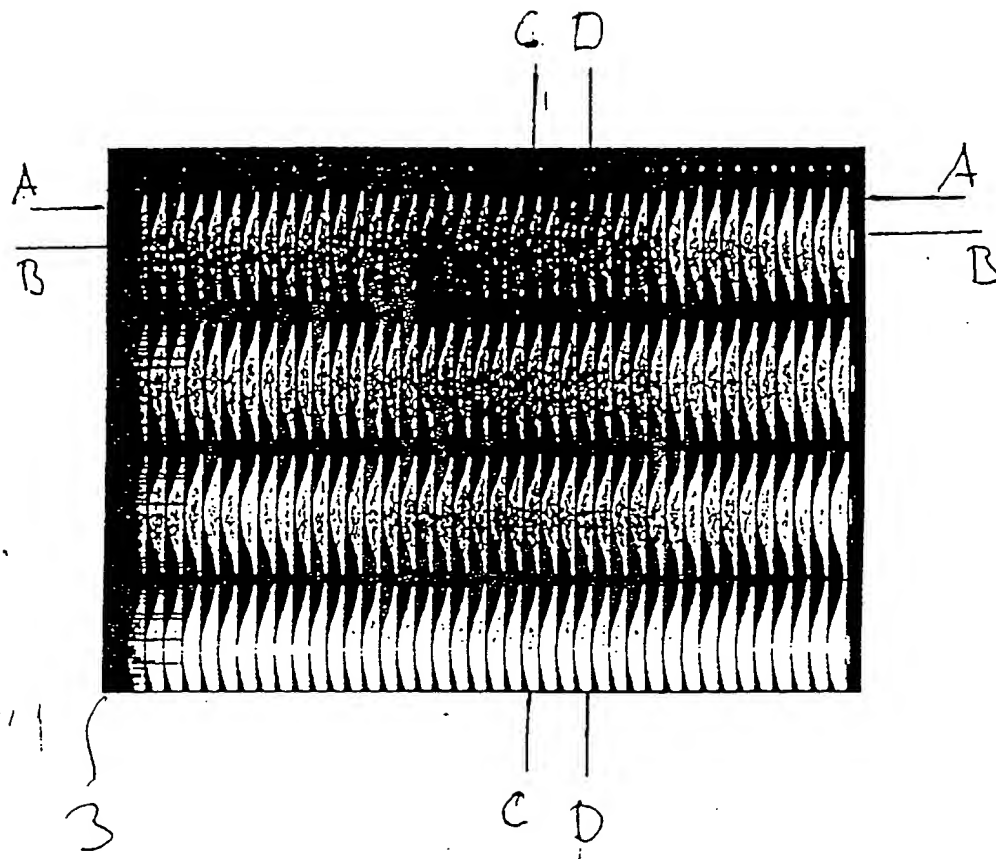
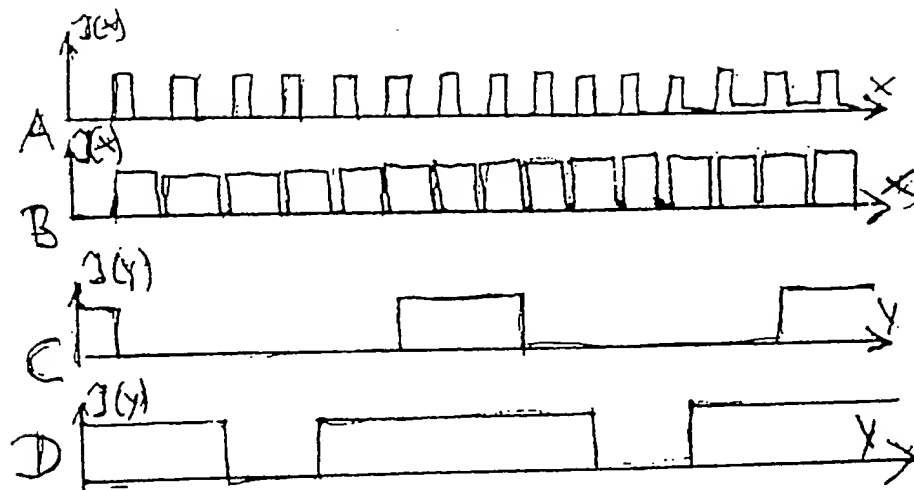


Fig. 2



Statement of Relevance
DE 4436500 A

Optical projection grating with binary density distribution - is mfd. by electron beam deposition with stripes of periodically varying width in longitudinal direction giving defined defocus

Abstract (Basic): DE 4436500 A

The stripe pattern of the grating (3) is projected on to the surface (6) under examination by a polychromatic source (1) with a collector lens (9) and eccentric stop (2), a beam-splitter (4) and an iris (12).

The reflected and/or scattered light passes through a projection lens (7) to a CCD camera (8) which has a frame grabber (9) linked to the personal computer (10) in control of the grating shifter (11).

USE/ADVANTAGE - As e.g. an accessory for surface structure measurement with a diffraction-limited single- or two-stage microscope, the grating exhibits smaller statistical and periodic brightness errors than its holographic counterpart.